

0-734091-1

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ**

На правах рукописи

Васильева Валерия Валентиновна

**ВАРИАЦИИ ВРАЩЕНИЯ СЕКТОРНОЙ СТРУКТУРЫ
КРУПНОМАСШТАБНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
СОЛНЦА**

01.03.03. - физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Санкт-Петербург - 2002

Работа выполнена на Кисловодской Горной астрономической станции
Главной астрономической обсерватории Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Макаров В.И.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Гельфрейх Г.Б.

(ГАО РАН)

кандидат физико-математических наук

Понявин Д.И.

(НИИФ СПб.ГУ)

Ведущая организация:

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн,
Москва, Россия

Защита состоится "6" 12 2002 г. в 11 часов 30 минут на
заседании Диссертационного совета К 002.120.01 по защите диссертаций
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в
Главной астрономической обсерватории Российской академии наук по
адресу:

196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д.65/1, ГАО РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН

Автореферат разослан "30" 10 2002 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
Кандидат физико-математических наук



Милецкий Е.В.

Актуальность работы

Вращение Солнца и звезд играет важную роль в понимании механизма генерации магнитного поля и природы солнечно-звездных циклов. Первые попытки найти вариации вращения Солнца по трассерам пятен показали противоречивые результаты. Тем не менее было показано, что скорость вращения Солнца изменяется с фазой 11-летнего цикла, а также, что экватор Солнца вращается несколько быстрее в минимуме активности (Balthasar, Wöhl, 1980).

Открытие крутильных колебаний стимулировало дальнейшее изучение дифференциального вращения Солнца. Были обнаружены зоны быстрого и медленного вращения, дрейфующие с высоких широт к экватору. Установлено, что значительные области поверхности Солнца, связанные с корональными дырами, вращаются квазитвердотельно.

Вместе с тем сегодня растет понимание, что активные области являются поверхностными трассерами в противоположность крупномасштабным фоновым магнитным полям, которые простираются глубоко внутрь конвективной зоны. Возможности современных солнечных наблюдений позволяют непосредственно проследить сложное поведение крупномасштабных структур. Некоторые долгоживущие квазистационарные процессы на Солнце, связанные с циклом активности, захватывают большую часть или даже всю его поверхность. Это относится к системам зональных границ нейтральных линий, корональным дырам и полярным факелам. Форма солнечной короны изменяется в ходе цикла, отражая эволюцию полей самого большого масштаба. Структура межпланетного магнитного поля и формирование высокоскоростных потоков солнечного ветра определяется крупномасштабными полями.

Важную роль в исследовании крупномасштабного магнитного поля Солнца играет изучение секторной структуры. Впервые существование секторной структуры было установлено по данным межпланетного магнитного поля. Для исследований межпланетного поля могут использоваться данные спутниковых наблюдений, наблюдения приполярных станций, а также анализ возмущений геомагнитных индексов. Вместе с тем существует определенная сложность в исследовании свойств магнитных полей Солнца по данным наземных или околоземных наблюдений, так как скорость прохождения магнитных возмущений от Солнца через межпланетное пространство зависит от их амплитуды.

Другим направлением в исследовании секторной структуры является анализ данных непосредственных наблюдений магнитного поля Солнца. Как правило, такие исследования проводятся по ежедневным данным

магнитографических наблюдений обсерваторий Маунт Вилсон, в Станфорде, КрАО и саянского магнитографа и охватывают период около ~30-40 лет. В результате этих исследований были установлены основные закономерности вращения Солнца как звезды для 3-х последних циклов активности.

Важным свойством секторной структуры являются относительно стабильные периоды вращения. Ряд исследований, выполненных по магнитографическим наблюдениям, показывает наличие у общего магнитного поля Солнца периодов вращения практически неменяющихся со временем (Ханейчук, 1999). Другие исследования по этим же данным выявили вариации периодов вращения с фазой цикла (Kotov et al., 1999). Это интерпретировалось как смещение крупномасштабных структур магнитного поля старого 11-летнего цикла и появление высокоширотных структур нового цикла. Основной сложностью при анализе вращения секторной структуры по данным магнитографических исследований, на наш взгляд, является трудность отдельного учета вклада крупномасштабных магнитных полей и полей активных областей, имеющих различные свойства.

В последнее время в качестве данных для исследования секторной структуры успешно применяются карты раздела полярности по наблюдениям в линии $H\alpha$. На этих картах отсутствует информация о величине, а представлена только полярность магнитного поля. Они отражают положение нейтральных линий определяемых по физическим трассерам, таким как волокна, протуберанцы, межфлоккульные каналы и др. Ряд $H\alpha$ - синоптических карт, созданный В.И. Макаровым с 1915 г. и продолженный на Горной станции ГАО, продемонстрировал свою значимость как для исследований вращения Солнца так и в установлении первичности роли крупномасштабных магнитных полей в формировании циклической активности (Makarov et al., 2001). Создание $H\alpha$ - синоптических карт позволило провести исследования динамики зональных границ крупномасштабного поля и выявить особенности переполюсовки, за период ~100 лет. По $H\alpha$ - картам были исследованы крутильные волны и выявлены закономерности их распространения. Обнаружены вековые изменения скорости распространения крутильных волн к экватору. Исследование долгопериодных вариаций секторной структуры по данным $H\alpha$ - карт с 1915 по 1990 гг. позволило выделить 55-летнюю волну в скорости вращения секторной структуры (Обридко, Шельтинг, 2000). В этой работе учитывался вклад от приэкваториальной зоны шириной $\pm 50^\circ$. В дальнейшем магнитное поле пересчитывалось на поверхность источника ($R=2.5R_\odot$). Этот метод несколько изменял топологическую картину раздела полярности, представленную на синоптических картах.

Вместе с тем связь вращения солнечной атмосферы с 11-летними и вековыми циклами активности является не до конца изученной. Исследование вращения секторной структуры Солнца может внести существенный вклад в решение этой проблемы. При этом наиболее перспективным является использование длинных рядов данных, например H α - карт. Важной задачей при этом является сопоставление результатов анализа данных по H α - синоптическим картам с другими данными, дающими информацию о секторной структуре, такими как геомагнитные индексы и магнитографические наблюдения. Увеличение длины исследуемого ряда H α - карт может дать новые результаты о долговременных вариациях вращения. Поэтому в предлагаемой работе было проведено восстановление синоптических H α - карт в 13-м и 14-м циклах активности, в период с 1887 по 1914 год.

Вопрос о формировании секторной структуры остается в настоящее время открытым. Вероятно, формирование секторной структуры тесно связано с механизмом формирования крупномасштабного магнитного поля. С другой стороны, секторная структура связана с долгоживущими активными долготами, проявляющимися как в распределении солнечных пятен так и других проявлениях солнечной активности. В этой связи становится важной задачей детальное исследование формирования крупномасштабного магнитного поля, его долготной неоднородности и связи с активными образованиями.

При выполнении работы применялись методы обработки изображений, включающие автоматическое выделение областей проявления солнечной активности, вычисление их координат, площади и других параметров. При восстановлении синоптических карт использовался комплекс программ для переноса трассеров нейтральных линий с ежедневных изображений Солнца на синоптические карты, учет дифференциального вращения и меридиональной циркуляции, композиция карт соседних оборотов, нахождение положения магнитной нейтральной линии. При анализе данных были применены численные методы трехмерного моделирования короны, статистического и корреляционного анализа.

Цели работы:

- восстановление структуры крупномасштабного магнитного поля за периоды 1887-1900 и 1904-1914 гг.
- исследование вариаций периодов вращения секторной структуры Солнца по H α - картам крупномасштабного магнитного поля за период с 1904 по 2000 год.

- исследование вращения активных образований на Солнце и анализ связи вращения активных образований и секторной структуры крупномасштабного магнитного поля.

Структура, объем и основное содержание диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и Приложения. Общий объем диссертации 134 страницы, в том числе 46 рисунков и 98 библиографических ссылок.

Во Введении определены цели работы, обсуждается актуальность, научная и практическая значимость работы. Кратко изложено содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В Главе I представлен обзор, посвященный исследованию секторной структуры магнитного поля Солнца. Секторная структура магнитного поля Солнца была обнаружена при изучении вариаций межпланетного магнитного поля (Wilcox, Ness, 1967). Было показано, что межпланетное магнитное поле на протяжении нескольких дней имеет преимущественное направление к Солнцу или от Солнца, затем за короткое время направление меняется на противоположное. Вскоре была выяснена тесная связь между вариациями межпланетного магнитного поля и распределением крупномасштабных магнитных полей на Солнце. Таким образом, эти исследования показали, что данные о секторной структуре межпланетного магнитного поля можно использовать для изучения свойств секторной структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца. Так, анализ вращения секторной структуры за пять 11-летних циклов (1926-1973 гг.) по ежедневным данным индексов геомагнитных возмущений наземных полярных станций показал, что секторная структура имеет переменные и многокомпонентные периоды вращения (Svalgaard, Wilcox, 1974). Были выделены компоненты, одна из которых имела период вращения $26^{\text{д}}.8\text{--}27^{\text{д}}.15$, а другая – около $28^{\text{д}}.5$. Было сделано предположение, что периоды вращения секторной структуры меняются с фазой солнечного цикла. Для первой половины цикла свойственны более короткие периоды $\sim 26^{\text{д}}.85$, для второй половины выявленные периоды ближе к $27^{\text{д}}.15$.

Большой вклад в исследование секторной структуры внесли магнитографические наблюдения. Благодаря ежедневным наблюдениям обсерваторий Маунт-Вилсон, Станфордской и КрАО, была детально исследована тонкая структура вращения общего магнитного поля Солнца за последние 30 лет, с момента регулярных магнитографических наблюдений. Было показано, что скорость вращения до переполюсовки меньше, чем после переполюсовки (Ханейчук, 1999). Так для 21 цикла период вращения до окончания переполюсовки составил $27^{\text{д}}.39$, а после

переполусовки – 26^d.89. Различие периодов объяснялось тем, какие широтные зоны на данной фазе цикла вносят больший вклад в сигнал общего магнитного поля Солнца. Из анализа спектров мощности было также показано, что лишь некоторые дискретные широты в каждой полусфере дают мощные пики (Antonucci et al, 1990). Эти широты не являются строго фиксированными, они меняются с фазой цикла. Было также показано, что период вращения 2-х секторной структуры меняется с фазой цикла, как и мощность пиков.

Исследования последних десятилетий показали, что определяющую роль в формировании общего магнитного поля Солнца и секторной структуры играют крупномасштабные магнитные поля. Используя ряд В.И. Макарова H α - синоптических карт с 1915 по 1990 гг., Обридко В.Н. и Шельтинг Б.Д. (Обридко, Шельтинг, 2000) провели анализ вариаций вращения крупномасштабных магнитных полей Солнца в диапазоне широт 50S-50N. В результате этих исследований, был сделан вывод: периоды ускоренного вращения возникают, как правило, на фазах спада и в минимуме циклов активности. Или это можно сформулировать иначе: повышение уровня активности сопровождается уменьшением скорости вращения и, наоборот, скорость вращения выше при более низкой активности. Это подтверждается как внутри 11-летнего цикла, так и на большем временном масштабе. Кроме того, было замечено, что интервал между 18 и 19 циклами был особым периодом в деятельности Солнца, в этот период скорость вращения была наименьшей. Эти исследования выявили 55-летний цикл во вращении секторной структуры.

Таким образом можно заключить, что скорость вращения секторной структуры не является величиной постоянной. Выявлено изменение скорости вращения с фазой солнечного цикла, а также был выделен 55-летний цикл во вращении секторной структуры. Проведенный обзор показал, что для исследований свойств секторной структуры одним из наиболее перспективных набором данных являются H α – карты.

Глава II посвящена описанию построения H α - синоптических карт для периодов 1887-1900 и 1904-1914 гг. и анализу их свойств. Эти карты дополняют ряд синоптических карт раздела полярности крупномасштабного поля, созданные В.И. Макаровым с 1915 г. и построение которых продолжается на ГАС ГАО в настоящее время.

В разделе II.1 описаны общие принципы построения H α – карт. Рассмотрены виды наблюдений, используемые при построении, описана методика определения знака магнитных полей.

В разделе II.2 проведен сравнительный анализ картины распределения полярности, полученной по H α – картам с магнитографическими наблюдениями. Для этого использовались данные наблюдений магнитографов обсерваторий Китт Пик и Станфорда. Предварительно

синоптические карты магнитных полей были приведены к системе $H\alpha$ – карт (± 1). Для этого на синоптических картах вместо величины магнитного поля рассматривался только знак. По приведенным рядам были построены широтно-временные диаграммы в период 1975-2002 гг. Детальное сравнение широтного положения зональных границ, моментов переполюсовок и отдельных флуктуаций магнитографических наблюдений с $H\alpha$ – картами показало хорошее согласие. Таким образом, была подтверждена эффективность использования $H\alpha$ – карт для изучения крупномасштабного магнитного поля.

В разделе II.3 детально описана процедура восстановления карт раздела полярности для 13 и 14 циклов активности. Для периода 1887-1900 гг. в качестве основных данных были использованы атласы А. Вольфера, в которых приведены наблюдения пятен, факелов и протуберанцев Цюрихской обсерватории. Количество дней наблюдений протуберанцев за год составляло 150-200.

Обработка атласов Вольфера (Wolfer, 1897) проводилась по следующей методике. Все синоптические карты (обороты N 352-513 в системе Шперера) были отсканированы. На ГАС ГАО были разработаны компьютерные программы для распознавания и оцифровки различных элементов активности. Далее координаты активных областей переводились от системы вращения по Шпереру к кэррингтоновской системе вращения. Общее число выделенных протуберанцев составило 18309. Восстановление топологии линии раздела полярностей проводилось в условиях недостаточного количества наблюдательных данных, прежде всего отсутствие данных о положении волокон. Для уменьшения ошибок построения использовался принцип переноса информации с соседних синоптических карт. Для этого долготные положения протуберанцев соседних оборотов пересчитывались с учетом дифференциального вращения на текущую карту. Помимо этого, применялась методика переноса уже построенных нейтральных линий из карт соседних оборотов на текущую карту. Положение групп пятен по данным Вольфера дополнялось положением групп пятен Гринвической обсерватории.

Для создания синоптических карт за период 1904-1914 гг. были использованы данные ежедневных наблюдений обсерватории Кодайканал (Индия). Предварительная обработка положений протуберанцев была проведена В.И. Макаровым. Эти данные широтного положения протуберанцев, их протяженности по широте и индекса принадлежности к западному или восточному лимбу были оцифрованы в виде соответствующих таблиц. Общее число занесенных протуберанцев составило 29862. Наличие ежедневных изображений в линии K CaII с 1905 года существенно повысило надежность восстановления

нейтральных линий. Большое число наблюдений позволило отобрать изображения хорошего качества, на которых можно было отождествить наиболее плотные волокна, видимые в линии K CaII. Для их обработки была разработана специальная методика. Для этого на компьютерное изображение солнечного диска накладывалась гелиографическая сетка. Затем обводились волокна по срединной линии и с помощью компьютерной программы переносились на синоптическую карту.

Был проведен анализ распределений протуберанцев в 13-м и 14-м циклах активности (1887-1914 гг.). Построены широтно-временные диаграммы и выполнено сравнение с индексом активности по пятнам.

Проведенная работа по восстановлению H α – карт позволила сформировать банк данных различных индексов топологии крупномасштабного магнитного поля в 13 и 14 циклах активности (1887-1914 гг.).

В разделе II.4 для вновь созданных рядов синоптических карт в период 1887-1914 гг. представлены результаты анализа основных топологических свойств крупномасштабного магнитного поля Солнца. Построены широтно-временные диаграммы распределения полярности и уточнены моменты завершения переполюсовки магнитного поля Солнца. Подтверждено, что в 14-м цикле активности в южном полушарии Солнца наблюдалась трехкратная смена знака. Изучено поведение общей длины нейтральной линии по вновь восстановленным H α – картам. Отмечается, что в период 1887-2000 гг. имеется тенденция к росту общей длины нейтральной линии и, как следствие, к изменению топологической сложности распределения крупномасштабного магнитного поля. Проведено разложение синоптических H α – карт по сферическим гармоникам за период 1887-1914 гг. Изучено поведение основных мультиполей и проведен их сравнительный анализ с ранее полученными данными за период 1915-2000 гг. Рассмотрено поведение дисбаланса избытка полярности в приэкваториальной ($\pm 5^\circ$) зоне. Выявлено наличие периодической 22-летней модуляции. Построены диаграммы долготавремя для изучения долгоживущих униполярных областей в 13 и 14 циклах активности (1887-1914 гг.).

В разделе II.5 проведено моделирование короны на момент затмения 16.04.1893. В качестве граничных условий на поверхности Солнца была использована восстановленная H α – синоптическая карта. В расчетах использовалась модель, учитывающая конечную проводимость солнечного ветра в виде зависимости магнитного числа Рейнольдса от радиуса $R_{em} = R_{em}(r)$. Моделирование конфигураций магнитного поля в короне заключалось в расчете компонент вектора $B(B_r, B_\theta, B_\varphi)$ в гелиографической системе координат (r, θ, φ) с выводом результатов в виде

трехмерной модели гелиосферного нейтрального слоя и в виде системы силовых линий магнитного поля.

Проведенное сопоставление с наблюдениями затмения выявило хорошее соответствие. Этот метод позволил установить, насколько соответствует восстановленное распределение полярности магнитного поля реальному распределению.

В Главе III представлены результаты исследования вращения секторной структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца на основе ряда H α - карт магнитных полей за период с 1904 по 2000 гг.

В разделе III.1 проведено сравнение результатов спектрального анализа получаемых при анализе магнитографических наблюдений и H α - карт. Сравнительный анализ основных периодов, соответствующих вращению секторной структуре магнитного поля, полученных по H α - картам и по магнитограммам обсерватории в Станфорде за временной интервал 1975-2000 гг., показал хорошее совпадение результатов, если на H α - картах рассматривать приэкваториальную зону $\pm 20^\circ$. В этом случае по двум независимым рядам наблюдений получаются близкие периоды вращения двухсекторной (~ 26.86 суток) и четырехсекторной структуры (~ 13.64 суток) с ошибкой ~ 0.01 суток.

В разделе III.2 был проведен анализ всего массива H α - карт. Для этого на H α - картах бралась полярность магнитного поля в ячейках сетки размером 10° по долготе и 5° по широте. Для каждого долготного отсчета на синоптической карте в прямоугольнике 40° по широте и 10° по долготе вычислялась нормированная величина $\alpha = (S_+ - S_-)/(S_+ + S_-)$, где S_+ и S_- соответствующие площади “+” и “-” полярности магнитного поля на 5-градусной сетке. Полный ряд $\alpha(t)$ за период с 1904 по 2000 год составил ~ 46400 значений.

На основе полученного ряда по H α - картам (1904-2000 гг.) были исследованы вариации периодов вращения секторной структуры. Для этого проводился спектральный анализ в “окнах” размером 1000÷2000 дней, перемещаемых вдоль ряда. В качестве спектрального метода использовался метод быстрого Фурье преобразования. Вместе с тем результаты были подтверждены и при использовании других методов: коррелоопериодограммного, ковариационного и авторегрессионного методов. Обнаружено, что периоды вращения секторной структуры имеют 22-летнюю модуляцию. Так для четырех секторной структуры периоды изменялись в диапазоне 13.4-13.8 суток, а двухсекторной в диапазоне 26.9-27.3 суток. Выявлена связь этих вариаций с 22-летним магнитным циклом активности. Показано, что наиболее быстрое вращение наблюдается в максимумах четных 11-летних циклов, а медленное – в максимумах нечетных циклов. Это явление может быть названо правилом Гневышева-Оля для вращения Солнца.

В разделе III.3 вводится индекс спектральной плотности мощности секторной структуры магнитного поля (*SSMP*), который определяется суммой мощности всех пиков на спектре $SSPM = \sum(a \cdot a + v \cdot v)$ для выбранного интервала периодов. Параметр *SSPM(t)*, очевидно, отражает наличие или отсутствие различных типов секторной структуры магнитного поля. Показано, что изменение величины этого индекса носит циклический 11-летний характер с максимумами в периоды минимума солнечной активности.

В разделе III.4 проведено сравнение введенного индекса *SSPM(t)* для четырехсекторной структуры с поведением чисел Вольфа *W(t)* с 1904 по 2000 год. Сравнение показало, что циклы активности секторной структуры магнитного поля *SSPM(t)* опережают на 5.5 лет как по амплитуде, так и по фазе 11-летних циклы активности пятен (числа Вольфа). Уровень корреляции составил ~ 0.85 . Это значит, что секторная структура крупномасштабного магнитного поля Солнца активно участвует в генерации магнитного поля и, следовательно, является одним из основных типов активности.

В разделе III.5 представлены результаты анализа изменения периодов вращения секторной структуры межпланетного магнитного поля (ММП) по данным ежедневных индексов геомагнитных возмущений: *aa* с 1868 г. и *K_p*, *A_p* с 1932 г. Использовался метод определения периодов в "окнах" шириной $\sim 1000 \div 2000$ дней, с последующим сдвигом окна вдоль ряда. Таким образом, была проведена оценка изменения периодов вращения для 2-х, 4-х и 6-ти секторной структур ММП. Показано, что характерные периоды секторной структуры межпланетного магнитного поля имеют 22-летнюю модуляцию. Наибольшие периоды вращения для 4-х секторной структуры свойственны эпохе 1945 \div 1960 гг. Проведено сравнение этих результатов с вариациями периодов секторной структуры, полученных при анализе *Ha* - карт крупномасштабного магнитного поля. Отмечено, что для *aa* индексов эти изменения по фазе и величине близки к изменениям по *Ha* - картам. Для *K_p* индексов, фаза 22-летней модуляции также близка к фазе вариаций по *Ha* - картам.

Проведен анализ индекса *SSPM(t)* по данным геомагнитных возмущений *aa*. Мощность секторной структуры ММП имеет свою периодичность близкую к 11 годам. Для диапазона периодов 12-15 и 8-10 сравнение с числами Вольфа показывает, что максимум *SSPM* приходится на периоды максимума солнечных пятен. В отличие от поведения *SSPM* для коротких периодов, поведение индекса *SSPM* для диапазона периодов 26-29 суток имеет максимумы в периоды минимума солнечной активности и демонстрирует связь с мощностью следующего цикла пятен.

Таким образом, по результатам анализа, проведенного, в данной главе можно сделать следующие выводы. Исследование вращения секторной

структуры магнитного поля Солнца по данным H α - карт с 1904 по 2000 год позволило обнаружить 22-х летнюю цикличность в вариациях периодов вращения 2-х и 4-х секторной структуры. В результате исследования индекса спектральной плотности мощности секторной структуры крупномасштабного магнитного поля (SSPM), показано, что циклы индекса SSPM опережают 11-летние циклы пятен на 5.5 лет. Этот результат согласуется с анализом, проведенным и по индексам геомагнитных возмущений.

Глава IV посвящена изучению долгоживущих структур крупномасштабного магнитного поля и их связи с долготной неоднородностью активных образований на Солнце.

В разделе IV.1 проводится анализ долготного распределения магнитных полей на основе анализа синоптических H α – карт. Методом подбора оптимальной скорости вращения в период 1945-2000 гг. были выделены на низких широтах ($\pm 20^\circ$) долгоживущие структуры крупномасштабного магнитного поля. Время жизни некоторых из этих структур составило более 150 оборотов, а долготная протяженность 60° - 100° . Найденная скорость вращения этих структур составила около 13.275 град./сутки, но она имела некоторые вариации, зависящие от времени. Наиболее стабильный период вращения долготных неоднородностей наблюдался после 19-го цикла активности. Определенная таким образом скорость вращения для долгоживущих структур крупномасштабного магнитного поля в 20 цикле (1965-1975 гг.) в целом соответствует скорости вращения секторной структуры в этот период.

Наиболее отчетливо долгоживущие структуры наблюдались в крупномасштабных магнитных полях в течение 20 цикла. Была составлена сводная карта, полученная путем наложения 100 синоптических карт для кэррингтоновских оборотов N 1500-1600. При этом первоначально каждая синоптическая карта была преобразована к системе координат, вращающейся со скоростью $\omega = 13.275$ град/сутки и после этого проведено наложение карт. На сводной карте отчетливо выделятся двух- и четырехсекторная структура. При этом в приэкваториальной области зоны положительной и отрицательной полярности были примерно одинакового долготного размера.

В разделе IV.2 проведено сопоставление выделенных долгоживущих структур с долготным распределением крупных (более >200 м.д.п.) солнечных пятен. Координаты солнечных пятен также пересчитывались на координатную сетку, вращающуюся со скоростью, соответствующей скорости вращения крупномасштабных полей. Была построена сводная синоптическая карта для пятен. Показано, что пятна концентрируются на тех же самых долготных интервалах, на которых были выделены долгоживущие униполярные структуры по H α - картам. Это позволило

подтвердить предположение об общей природе долготной неоднородности сильных и слабых магнитных полей.

В разделе IV.3 проведено сопоставление долготной неоднородности мелкомасштабных магнитных образований с пятнами и корональными дырами. Для этого использовалась обработка ежедневных магнитограмм обсерватории Китт Пик за период 1994-2000 гг. При этом выделялись структуры различной площади с напряженностью магнитного поля не менее ± 10 Гс. Было проведено сравнение долготного распределения для различных фракций, выделенных элементов. Показано, что в распределении структур площадью от 100 до 300 м.д.п. наиболее отчетливо выделяются долготные неоднородности. Сравнение с распределением солнечных пятен показало, что пятна ложатся на эти долготные неоднородности, выделяемые мелкомасштабными магнитными образованиями. Активные долготы трассируются мелкомасштабными магнитными структурами, выделяя их как непрерывные ($\sim 20^\circ$) узкие полосы, имеющие наклон на кэррингтоновской сетке. В период 1994-1996 гг. для приэкваториальной зоны этот наклон соответствует синодической скорости вращения ~ 13.38 град./сутки, что соответствует периоду 26.9 суток. Интересно заметить, что вращение секторной структуры по На – картам в 22-м цикле показывает тот же период.

Анализ долготной неоднородности мелкомасштабных магнитных образований для различных широтных зон показал, что активные долготы наиболее отчетливо выделяются для приэкваториальной широтной зоны $\pm 20^\circ$, на высоких широтах выделить долгоживущую долготную неоднородность не удалось.

В разделе IV.4 проведено сравнение скорости вращения секторной структуры крупномасштабного магнитного поля и солнечных пятен для приэкваториальной зоны $\pm 20^\circ$. Для этого по данным обсерватории в Гринвиче вычислялась средняя за цикл скорость вращения групп солнечных пятен. Полученная кривая для скорости вращения групп пятен сравнивалась со сглаженной (по 15 годам) кривой скорости вращения 2-х секторной структуры магнитного поля Солнца. Показано, что во вращении секторной структуры, как и во вращении пятен, выделяется 55-летняя модуляция с наиболее медленным вращением в 18 цикле.

В разделе IV.5 выполнен анализ долготной неоднородности короны, наблюдаемой в линии FeXIV 5303А и FeX 6374А. Использовался ряд Кисловодской Горной станции с 1957 г. Временные ряды красной и зеленой короны были представлены в 5-градусных интервалах по широте и долготе. Поиск активных долгот в 10-градусных широтных интервалах проводился как на кэррингтоновской сетке, так и при перестройке сетки на другой период вращения. Показано, что относительно стабильное положение активных долгот наблюдается на собственной скорости

вращения. Активные долготы красной и зеленой короны располагаются в близких долготных интервалах.

Проведенный анализ для различных широтных интервалов по различным трассерам активности показывал, что неоднородность долготного распределения свойственна, в основном, средним и низким гелиоширотам, на широтах выше 50° долготные неоднородности выделить не удалось.

Таким образом, результаты анализа, представленные в настоящей главе, выявили связь в распределении сильных и слабых магнитных полей. Показано, что мелкомасштабные элементы, составляющие крупномасштабное магнитное поле, имеют довольно значительную долготную неоднородность. Совокупность этих элементов образует области их повышенной концентрации шириной $\sim 20^\circ$ по долготе и временем жизни $\sim 1-2$ года. Показано, что пятна концентрируются на тех же самых долготных интервалах, что и долгоживущие структуры крупномасштабного магнитного поля, а так же, что пятна и корональные дыры ложатся на долготные неоднородности, выделяемые мелкомасштабными магнитными структурами. Сравнение долготной неоднородности по различным индексам активности, показывают, что долготная неоднородность крупномасштабного поля является, вероятно, первичной. Исследования показали, что оптимальной широтной зоной для изучения свойств долгоживущих образований на Солнце является приэкваториальная зона.

В **Заключении** кратко суммированы результаты диссертации и обсуждаются пути для продолжения построения ряда синоптических $H\alpha$ – карт и их использования для изучения вращения крупномасштабного магнитного поля Солнца.

Приложение. Проведенная работа по восстановлению топологии крупномасштабного магнитного поля в 13 и 14 циклах активности (1887-1914 гг.) позволила сформировать банк данных, записанный на CD, в котором представлены:

- отсканированные изображения атласов Вольфера за период 1887-1900 гг.;
- оцифрованные координаты положения протуберанцев по атласам Вольфера и по данным наблюдений обсерватории Кодайканал;
- оцифрованные синоптические карты в системе “ ± 1 ” для кэррингтоновских оборотов 445-814 с разрешением 10×10 градусов;

- синоптические карты в системе указания широт точек, пересечений нейтральных линий с 10-ти градусными долготными меридианами;
- гармонические коэффициенты разложения полярности магнитного поля Солнца по сферическим функциям ($l=0\div 9$)

Научная новизна работы.

В работе получены *новые* данные о свойствах крупномасштабных магнитных полей. В частности, *впервые*:

- восстановлена топологическая структура и проведено детальное исследование крупномасштабного магнитного поля в 13 и 14 циклах активности (1887-1914 гг.);
- показано, что вращение секторной структуры магнитного поля имеет 22-летнюю цикличность; двух- и четырехсекторная структура вращается быстрее в максимумах четных 11-летних циклов и медленнее в максимумах нечетных циклов.
- установлено, что 11-летние циклы активности секторной структуры предшествуют на 5.5 лет циклам активности пятен.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Создание Атласа синоптических $H\alpha$ - карт распределения полярности крупномасштабных магнитных полей на Солнце с 1887 по 1914 год в качестве дополнения к созданному ранее Атласу $H\alpha$ - карт с 1915 по 2001 год.
2. Результаты анализа свойств крупномасштабного магнитного поля Солнца в 13 и 14 циклах активности (1887-1914 гг.).
3. Результаты исследования вращения секторной структуры магнитного поля Солнца по данным $H\alpha$ - карт с 1904 по 2000 год. Обнаружение 22-летней цикличности во вращении секторной структуры.
4. Результаты исследования индекса спектральной плотности мощности секторной структуры крупномасштабного магнитного поля ($SSPM$). Показано, что циклы индекса $SSPM$ опережают 11-летние циклы пятен на 5.5 лет.
5. Результаты анализа вращения долгоживущих (порядка нескольких лет) активных образований магнитного поля в приэкваториальной области Солнца и их связь с вращением

Личный вклад автора

Во всех работах автор принимал участие в формулировке задач, выработке методики построения синоптических $H\alpha$ - карт и проведения статистических расчетов. Относительно работ, выполненных в соавторстве, следует отметить, что автор для построения $H\alpha$ - карт использовал в качестве основы методику и данные, предоставленные В.И. Макаровым. Часть программ для построения карт и анализа были разработаны А.Г.Тлатовым. В дальнейшем построение карт проводилось непосредственно автором. При анализе вращения секторной структуры и выделения долгоживущих долготных образований автором проведены основные вычисления.

Научное и практическое значение

Восстановленные карты распределения полярности, дополнили уже существующий ряд $H\alpha$ - карт. Наличие длинного ряда имеет большое значение для изучения долговременных вариаций свойств крупномасштабных магнитных полей. Полученные в диссертации результаты продемонстрировали плодотворность использования ряда синоптических $H\alpha$ - карт для изучения долговременных вариаций активности и вращения солнечной атмосферы. Найденные вариации периодов вращения секторной структуры Солнца и связь между секторной структурой крупномасштабного поля Солнца и уровнем активности может быть использована для построения моделей солнечной цикличности.

Апробация

Основные результаты, приведенные в диссертации, докладывались на конференциях: “Современные проблемы солнечной цикличности” (Санкт-Петербург, ГАО, 1997); “Новый цикл активности Солнца: наблюдательные и теоретические аспекты” (Санкт-Петербург, ГАО, 1998); по Солнечной физике (КрАО, 1998); “Крупномасштабная структура солнечной активности” (Санкт-Петербург, ГАО, 1999); “Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналоги” (Санкт-Петербург, ГАО, 2000); “Солнце в эпоху смены знака магнитного поля” (Санкт-Петербург, ГАО, 2001); на Всероссийской Астрономической конференции (Санкт-Петербург, СПГУ, 2001), “Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца” (Санкт-Петербург, ГАО, 2002).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Макаров В.И., Тавастшерна К.С., Васильева В.В. "О законе Хэйла для крупномасштабных магнитных полей в период 1925-1982 г.г." // Солн.данные-1987.- №12-С.59-63.
2. Васильева В.В., Тлатов А.Г. "Долготное распределение интенсивности спектральной короны 5303 и 6374А в период 1957-1994 гг." // Труды конф.: Современные проблемы солнечной цикличности – Санкт-Петербург, ГАО РАН, 1977.-С.287-291.
3. Тлатов А.Г., Васильева В.В. "Образование полостей вокруг спокойных протуберанцев с учетом пересоединения и диссипации магнитного поля" // Труды конф.: Современные проблемы солнечной цикличности – Санкт-Петербург, ГАО РАН, 1977.-С.410-414.
4. Макаров В.И., Тлатов А.Г., Васильева В.В. "О зоне генерации крупномасштабного магнитного поля Солнца" // Известия ГАО: Астрофизика-1998.-№212.С.41-47.
5. Васильева В.В., Тлатов А.Г. "Долготная структура крупномасштабного магнитного поля Солнца в период 1945-1997 гг." // Известия ГАО: Астрофизика-1998.-№212.С.230-236.
6. Васильева В.В. "Восстановление синоптических карт крупномасштабных магнитных полей за период 1880-1914 гг." // Труды конф.: Новый цикл активности Солнца: наблюдательные и теоретические аспекты - Санкт-Петербург, ГАО РАН, 1998.-С.213-216.
7. Васильева В.В., Тлатов А.Г. "Крупномасштабная структура солнечной короны и фотосферных магнитных полей по данным наблюдений затмения 1893г. и модельных расчетов." // Тезисы конф.посв.50-летию ГАС - Санкт-Петербург, ГАО РАН, 1998.-С.12.
8. Васильева В.В., Тлатов А.Г. "Особенности широтного и долготного распределения полярных факелов в период 1982-1988 гг." // Труды конф.: Крупномасштабная структура солнечной активности: достижения и перспективы - Петербург, ГАО РАН, 1999.-С.43-47.
9. Васильева В.В., Макаров В.И., Тлатов А.Г. "О периодах вращения секторной структуры по солнечным пятнам и крупномасштабным магнитным полям" // Труды конф.: Крупномасштабная структура солнечной активности: достижения и перспективы – Санкт-Петербург, ГАО РАН, 1999.-С.37-42.
10. Васильева В.В. "Восстановление структуры крупномасштабных

магнитных полей” // Тезисы докл. конф.: Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналоги - Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2000.-С.20.

11. Васильева В.В., Макаров В.И., Тлатов А.Г. “Циклы вращения магнитного поля Солнца и его активность” // Труды конф.: Солнце в эпоху смены знака магнитного поля - Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2001.-С.79-87.
12. Васильева В.В., Макаров В.И., Тлатов А.Г. “Циклы вращения секторной структуры магнитного поля Солнца и его активность” // Письма в АЖ – Москва, 2002.-Т.28.-3.-С.228-234.
13. Васильева В.В., Тлатов А.Г. “Изменение периодов секторной структуры ММП” // Тезисы докл. конф.: Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца - Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2002.-С.22.
14. Васильева В.В. “Мелкомасштабная структура активных долгот” // Тезисы докл. конф.: Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца - Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2002.-С.21.

Цитируемая литература:

1. Balthasar H., Wöhl H., 1980, *Astron. Astrophys.* V.92. P.111..
2. Ханейчук В.И., 1999, *Астр.журн.*, Т.76. С.385.
3. Kotov V.A., Scherrer P.H. Howard R.F., Heneychuk V.I., 1999, *Astrophys.J.* V.116. P.103
4. Makarov V. I., Tlatov A. G., Callebaut D. K., Obridko V. N., Shelting B. D., 2001, *Solar Physics* V.198. P.409.
5. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., 2000, *Астрон. журн.* Т.77. С.303
6. Wilcox J.M., Ness N.F., 1967, *Solar Physics.* V.1. P.437.
7. Svalgaard L., Wilcox J.M., 1974, *Solar Physics,* V.34. P.461.
8. Antonucci E., Hoeksema J.T., Scherrer P.H. *Astrophys.J.*, 1990, V.360. P.296
9. Beobachtungen der sonnenoberflacher in den janren , von A. Wolfer,— Zurich, 1897, V.1-4.